

(解説)

# 油圧ショベルの動的挙動シミュレーション技術

## Technology for Simulating Dynamic Motion in Hydraulic Excavators



川端将司\*1

Masashi KAWABATA



森 辰宗\*1

Yoshimune MORI

The dynamic motions of hydraulic excavators were analyzed by simulation. The structure of the hydraulic excavator was modeled using the finite-element and integrated component mode methods. The simulations included the vibration analysis of a crawler traveling on flat and rough roads as well as the analysis of dynamic stability in excavator attachment operations. It was found that the simulations accurately reproduced the dynamic behavior of the excavators and shortened the period required for new product development, particularly in the stage of advanced designing.

ま え が き＝油圧ショベルなどの建設機械の開発においては、ユーザニーズや環境変化に対応した新製品をタイムリーに市場に投入するために、開発期間の短縮が必要となっている。短期開発のためには、試作前の設計段階での高精度なシミュレーションによる事前評価により、試作機試験で発生する不具合をできる限り少なくしなければならない。

近年のCAE技術によれば、ハードウェア、ソフトウェアの進歩により、設計者が開発初期段階で3次元CADによる設計および有限要素法(Finite Element Method, 以下FEMという)による剛性評価、強度評価を行えるようになってきた<sup>1)</sup>。しかし、FEMによる事前評価は適切な境界条件、荷重条件をもとに行わなければ十分な精度で評価を行うことができない。

油圧ショベルの走行や掘削などの作業に対してシミュレーションを行う場合、構造物の大変位運動や複雑な構造物間の接触を考慮する必要があり、従来のFEMでは動的に発生する荷重や振動を評価することは難しい。そこで、油圧ショベル全体系の動的挙動をシミュレーションにより予測する手法として、走行クローラ構造やアタッチメント、アッパフレームなどの構造物を含めたショベル全体系モデルを構築し、マルチボディダイナミクスの手法を用いた予測手法を開発した。それらを実現するための機構解析ツールとして、RecurDyn<sup>2)</sup>を用いた。RecurDynは機構・構造の連成解析機能を持ち、油圧ショベルの走行機構である履帯(クローラ)構造をモデル化するためのユーザインタフェースを有しており、大変形かつ接触を考慮した解析が可能なソフトウェアとしてこれらの解析に適している。接触を考慮した解析は、通常多大な計算時間を要するが、Recursive Formulation理論を用いた定式化により、計算速度が非常に速い特徴を持っており<sup>3)</sup>、設計段階での繰返し検討を行う際に有利と

なる。

本稿では、RecurDynを用いた油圧ショベル動的挙動シミュレーションの事例として、ラフロード走行時の動的強度評価、平地走行振動評価、およびアタッチメント動作時の車体挙動(以下動安定挙動)評価を行った結果について紹介する。

### 1. 解析モデル

クローラ式油圧ショベルの走行時の車体振動は、地面とクローラとの接触部から荷重が加えられ、その力と慣性力によってロワフレーム、アッパフレームなどの構造物が弾性変形することにより生じる。また、掘削などの作業時の振動では、アタッチメントの機構部品であるシリンダの特性やアタッチメント自体の弾性変形が挙動に影響する。これらの動作に対して、精度よく車体の挙動を解析で把握するためには、クローラ部分の接触を考慮したモデル化と、各フレーム、アタッチメントの弾性変形を考慮したモデル化が必要である。

走行系の解析を行う場合、クローラの各コンポーネント(スプロケット、ロワローラ、トラックリンクなど)のモデル化を詳細に行う必要があるが、RecurDynはこれらを剛体として形状をモデル化し、それぞれの接触を考慮した解析を行っている。ロワフレーム、アッパフレーム、アタッチメントなどの弾性挙動を表現したい構造物については、MSC/NASTRANを用いて各構造物の固有値解析を行い、その結果の固有モードおよび質量・剛性マトリクス、節点・要素情報をRecurDynに取込み、モード合成法に基づいた解析を行う。モード合成法による解析では、評価すべき構造物の変形が考慮する固有モードで表現できている必要がある。計算時間が少なく済む反面、固有値解析の精度が十分でなければ応答解析の精度が悪くなる可能性がある。しかし、FEMモデルの全自

\*1(株)神戸製鋼所 技術開発本部 機械研究所

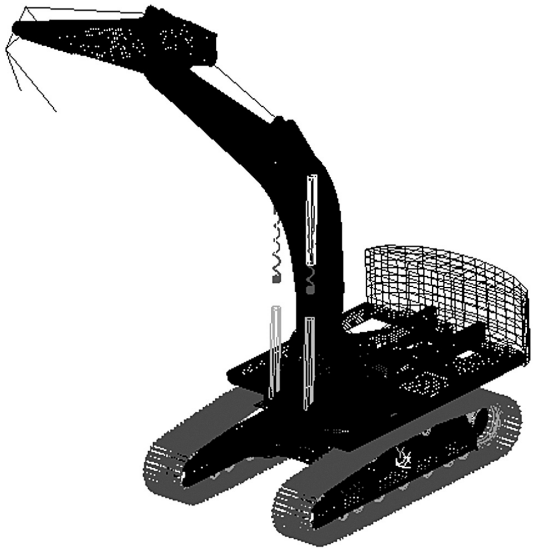


図1 油圧ショベルの解析モデル  
Fig. 1 Simulation model of hydraulic excavator

自由度を考慮した解析や、近年提案されている弾性体間での接触を考慮できる手法は、油圧ショベルのような複雑構造物の挙動解析では計算時間がかかりすぎて実用的ではない。そこで、固有値解析の境界条件を工夫することによって、実際に発生する動的な挙動を表現できるようにモデル化を行い、モード合成法でも実用的な精度を確保している。

図1はアタッチメント、アッパフレーム、ロワフレームの構造物をそれぞれFEMモデルとし、クローラ走行体はRecurDynツールを用いた剛体機構系、アタッチメントの起伏シリンダは実機油圧シリンダを模擬したスライダ+バネ要素で構成したモデルの一例を示している。

どこまでの構造物を弾性体としてモデル化するかは、設計のどの段階で実施するか、および解析目的に応じて決定する。たとえば、初期段階でクローラ走行部分のコンポーネントの概略設計を行う場合は、各構造物は重量、慣性、重心位置などを表現した剛体モデルによる解析で十分である。ラフロード走行でアッパフレームの強度のみを評価したい場合は、アタッチメント部は剛体と質量要素で表現するなど簡易化し、弾性変形を考慮したモデル化はアッパフレームとロワフレームに絞ることで計算をより高速化することができる。

## 2. 解析事例

本章では、平地走行振動解析、ラフロード走行時のフレームなどの強度を評価する動的挙動解析、アタッチメント動作時の車体挙動（動安定挙動）を評価する動安定挙動解析の事例を紹介する。

### 2.1 平地走行振動解析

油圧ショベルの平地走行時の振動は、クローラ走行体と地面との接触により発生する反力が加振力となって発生する。ロワローラやアイドル、スプロケットなどの構成部品はその加振力の大きさに寄与するため、振動を考慮してその形状や配置などの設計を行う。図2は走行振動の解析モデルを示す。走行時の加振力の大きさは、ロワローラの位置により大きく左右されるが、その位置を

変更した油圧ショベルを試作して検討すると多大な開発期間を要する。一方、解析上でその位置を変更し、図3に示すような車体の応答加速度を出力してその大きさを評価することは短期間で実施することができる。また、アッパローラの位置はクローラのばたつき現象に寄与するが、これも同時に解析上で検討することができる。これらの事前解析によって開発のスピードアップに大きく貢献した。

### 2.2 ラフロード動的挙動解析

ラフロード試験は、悪路を想定してブロックを配置した路面の上で油圧ショベルを走行させて（図4）、各部の耐久性を評価する試験である<sup>4)</sup>。この試験で不具合が発生し、対策・再試験を行うと開発期間の増大を招くこと

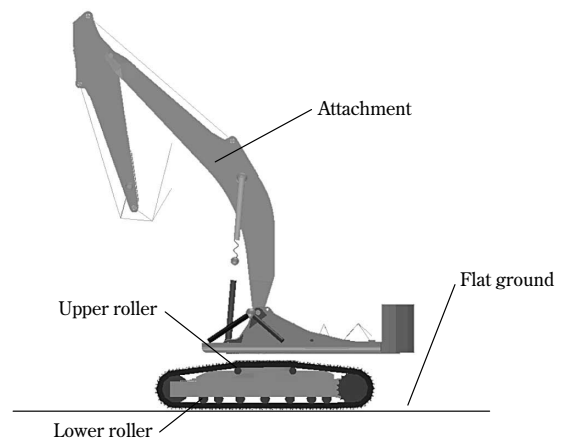


図2 平地走行解析モデル  
Fig. 2 Simulation model for flat ground traveling

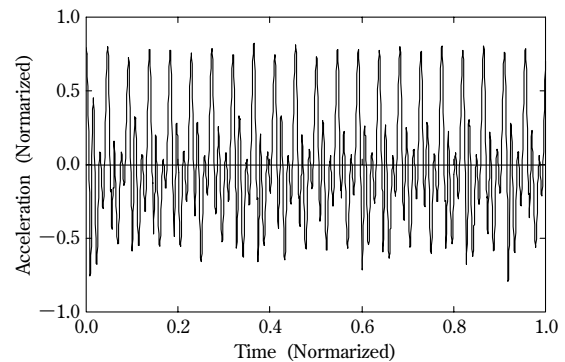


図3 平地走行解析結果  
Fig. 3 Simulation result of flat ground traveling



図4 ラフロード走行試験  
Fig. 4 Rough road traveling test

となるため、事前にラフロード走行時の挙動を予測することは重要である。ラフロード路面をRecurDyn上でモデル化し、その上で油圧ショベルを走行させることで、ラフロード走行時の挙動をシミュレート可能となる。その際、解析モデルをどこまでFEM弾性体モデルで表現するかは、解析目的により適切に選択する。

アッパフレームの応力評価を目的とした解析においては、アタッチメントおよびボウフレームは、重心位置、重量・慣性モーメントを表現した剛体モデルとし、アッパフレームのみ弾性体モデルを用いた。このモデルを用いて、単一のラフロードブロックを乗越える挙動解析を実施した。図5はそのときのアッパフレームの応力コンター図を示している。

挙動解析におけるFEMの応力は、応答解析のモード座標の応答と、固有値解析で得られる応力モードの計算結果をもとに算出可能である。図6にアッパフレームのある要素の応力波形出力結果を示す。このように時間軸で応力波形を出力することができるため、頻度解析を行って寿命評価につなげることが可能となる。実機試験結果との整合性については、部位によってはまだ差異が大きいこともあるが、これまでの静的な解析では評価できなかったラフロードで発生する振動によって生じる応力を評価することができるようになった。

ラフロード挙動解析は応力評価のみならず、エンジンなどの動力部品や燃料タンクなど、搭載物の振動挙動を

評価することも可能であり、搭載する機器の耐振動設計要件の検討にも使用できる。

### 2.3 動安定挙動解析

油圧ショベルの作業時において、土砂を積んだ状態でアタッチメントを速い速度で動かしたとき、その慣性力によって車体が浮き、連続操作などの際に車体全体が大きく振動する挙動がある。車体が浮上ると、その着地時の衝撃により大きな振動が発生することから、アタッチメントを最大速度で振下げたときの挙動（動安定挙動）を解析評価した。この解析では図1に示す詳細なモデルを用いている。図7に示すようにアタッチメントを伸ばした状態で振下げたとき、後方が浮上の現象が起こる。このときのスプロケット部の上下変位波形を図8に示す。車体後方はいったん大きく浮上り、その後も数回小さく浮上る結果となっているが、この結果は実機とまったく同様の動きが再現できている。図9はこのときのキャブの前後振動加速度の波形を示しているが、後部の着地の直後に大きな振動が発生していることがわかる。キャブは重量・慣性を表現した剛体モデルで、防振用のキャブマウントの特性を考慮したモデル化を行っている。この衝撃により発生する振動は、実機ではオペレータの乗心地評価に影響するものであり、このシミュレーション技術によって事前に検討することが可能となった。

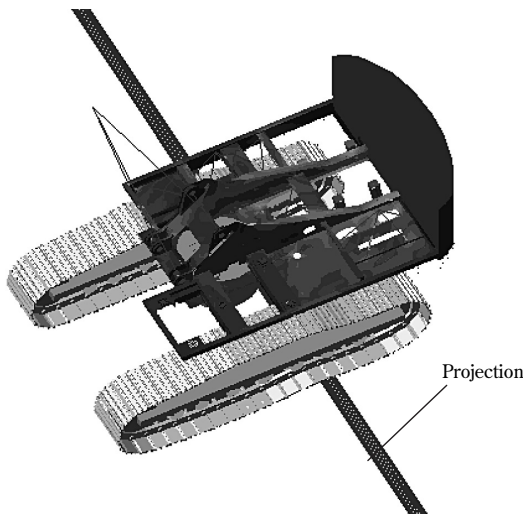


図5 ラフロード解析の応力コンター図  
Fig. 5 Stress contour of rough road simulation

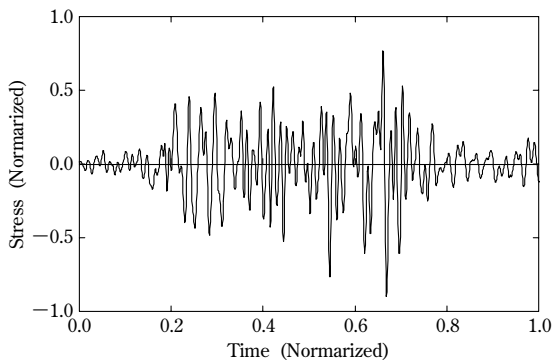


図6 ラフロード解析の応力応答  
Fig. 6 Stress response of rough road simulation

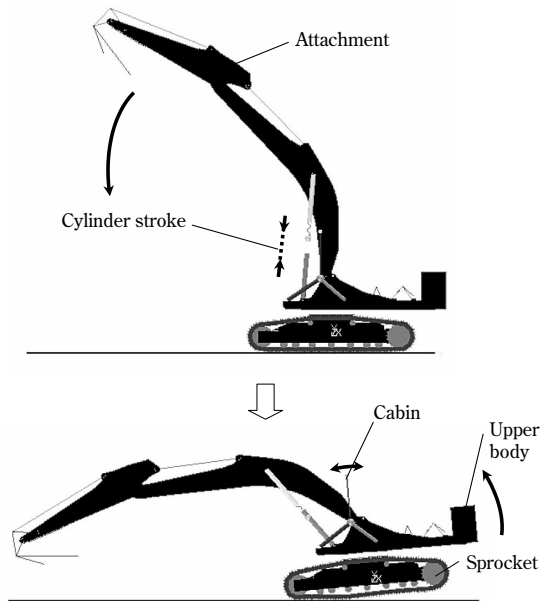


図7 アタッチメント動作時のシミュレーション  
Fig. 7 Simulation of attachment operation

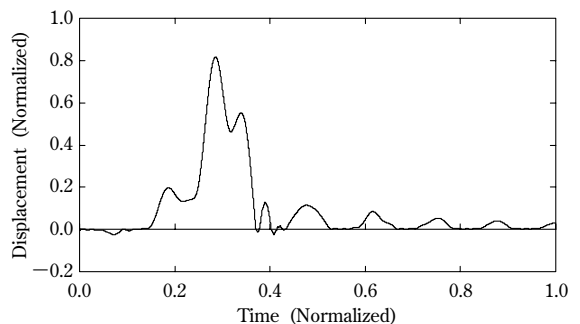


図8 スプロケット部の変位応答  
Fig. 8 Displacement response of sprocket

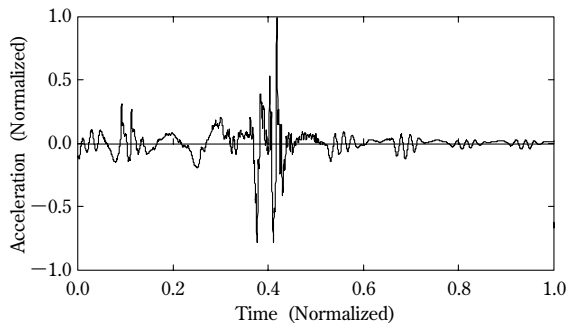


図9 キャブの加速度応答  
Fig. 9 Acceleration response of cabin

むすび＝動的挙動シミュレーション技術による，油圧シヨベルのラフロード走行解析，平地走行振動解析，動安

定挙動解析の事例について紹介した。これらの技術により，試作段階で発生する振動問題や動的に発生する強度を設計の初期段階にて予測することができる。このため，試作機の完成度を向上させ，開発のスピードアップを図ることが可能となる。

#### 参考文献

- 1) 西垣一朗ほか，日本機械学会2004年度年次大会講演論文集(6). 2004-9-5-9, No.04-1, p.89-90.
- 2) ファンクションベイ(株). <http://www.functionbay.co.jp/>, (参照2011-05-22).
- 3) T. Suzuki et al., Proc. of ACMD, 2002, p.600-601.
- 4) 川端将司ほか，R&D神戸製鋼技報，2007, Vol.57, No.1, p.58.